干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2020.01.03

灰色理论在舟曲南屿沟泥石流灾害危险性评价中的应用研究①

郭光玲[1]， 郭 瑞[1]， 顾箭峰[2]， 李 军[1]， 郭 鸿[1]， 陈能远[3]

（1 陕西理工大学土木工程与建筑学院，陕西 汉中 723001； 2 武汉工程大学土木工程与建筑学院，湖北 武汉 430073； 3 信息产业部电子综合勘察研究院，陕西 西安 710054）

摘 要：为分析不同因素对泥石流灾害危险性的影响程度，基于对舟曲南屿沟泥石流灾害影响因素调查结果总结和分析，利用灰色理论分析了泥石流灾害危险性与影响因素间关联程度，并建立了其预判模型。结果表明：沟岸坡度、沟道堵塞程度及冲淤变幅，沟道平均纵坡降和长度，沟道内植被覆盖率、流域面积及人口密度，松散固体物源量和灾害点密度等因素的影响程度较接近；相同区域内不同沟道泥石流灾害危险性程度受沟岸坡度、沟道堵塞程度、冲淤变幅、沟道平均纵坡降及长度等因素影响显著；基于自然和人为因素建立了泥石流灾害易发程度预估模型，其能够为区域内泥流灾害防治工作部署提供依据。

关 键 词： 地质工程；泥石流灾害；灰色理论；危险性评价

泥石流灾害具历时短、破坏程度大及成灾快等特点，是山区常见突发性地质灾害形式之一，其对沟道所在区域内人民生命和财产安全及周围生态环境易造成巨大破坏。2010 年 8 月 8 日，甘肃舟曲发生的特大泥石流灾害引起 490 多人失踪、1 240 多人遇难，受泥石流损坏和冲毁房屋达 220 余栋、掩埋农田达 13.3 hm^2 等。根据有关部门统计我国每年因泥石流等地质灾害造成的人员伤亡和经济损失量约占自然灾害引起人员伤亡总数一半以上[1]。近年来，国内外学者对泥石流危险性问题进行了较多研究，并提出诸如：层次分析法[2-4]、人工神经网络法[5]、熵值法[6]、试验和数值模拟方法[7-8]及模糊综合评价[9]等，为泥石流危险性预测和评估提供了理论依据。层次分析法尽管具有计算快速和简便等特点，但其计算结果差异性较大。人工神经网络法是泥石流危险性评价稳定可靠的方法之一，但其需以大量已知样本为基础，对模型进行训练，已知样本越多，训练出的网络模型效果越好，计算过程较为繁琐。熵值法避免了层次分析法的不足但其受数据波动影响，故计算结果的精确性较差。试验和数值模拟方法通过室内模拟泥石流实际发生，但泥石流的发生受多因素影响，且不同因素对其危险性的影响不尽相同，模型试验难以获得精确值。灰色理论法克服了传统分析方法要求大样本和计算量大等不足，其可以从诸多因素中分析出影响系统的主要因素、主要特征及不同因素对系统影响的差异，其结果与定性分析结果相吻合，具有广泛的实用性[10-11]。甘肃舟曲泥石流灾害为国内发生的特大型泥石流灾害之一，其野外资料具有一定代表性和典型性。本文以甘肃舟曲南屿沟泥石流灾害为依托，分析了泥石流灾害危险性与各影响因素间关联程度，以探明不同影响因素间主次关系，并建立以主要影响因素为参数的泥石流灾害危险性预测模型，为类似地区泥石流灾害的防治提供借鉴和依据。

1 研究区概况

甘肃省舟曲县位于甘南藏族自治州东南方向，其四面环山，地形呈宽带状展布。南峪沟位于舟曲县城东南方向，位于白龙江南岸的南峪乡境内，其流

① 收稿日期：2018-05-11； 修订日期：2019-10-29
基金项目：陕西省 2018 年重点研发计划项目(2018ZDXM-SF-024)；陕西省教育厅 2019 年度专项科学研究计划(19JK0185)
作者简介：郭光玲(1973-)，女，陕西城固人，副教授，硕士生导师，主要从事建筑结构抗震加固研究. E-mail：ggl750320@126.com
通讯作者：顾箭峰(1986-)，男，湖北咸宁人，博士，主要从事公路桥梁专业教学与科研工作. E-mail：gujianfeng.12345@163.com

域总面积约 43.8 km²。根据野外调查,可将南屿沟泥石流灾害的形成分为图 1 所示分区。南峪沟内沟谷发育,主要分布有南峪沟、磨儿坪沟、安门下沟、安门下支沟、黑松坪沟、黑松坪支沟及黑山沟等 10 条主要沟道,如图 2 所示。根据野外调查南峪沟地处秦岭东西向构造带的西延部分,构造活动十分强烈,沿南北两侧形成沿北西向展布且大致平行的断裂带。调查区位于青藏北部地震区南北地震带、舟曲—武都地震亚带。经野外实地调查,南峪沟内分布有崩塌、滑坡等各种地质灾害共 36 处,其中滑坡崩塌 11 处、滑坡 5 处、不稳定斜坡 3 处、坡面泥石流等 17 处,各沟道地质灾害点分布不均,其与区域内最大降雨量、地表水系及人类工程活动等分布具有一致性,与区域内地层岩性分布具有差异性。

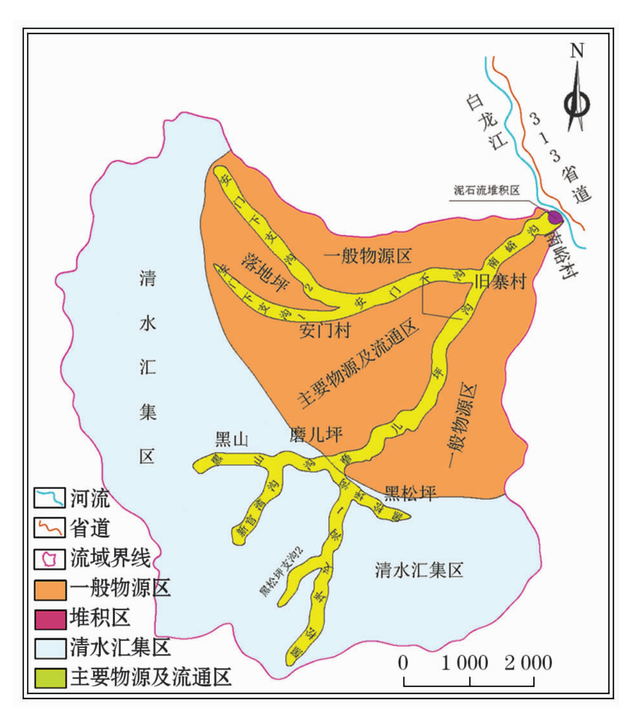


图 1 南峪沟泥石流分区

Fig. 1 Regional division of debris flow in Nanyu Gully

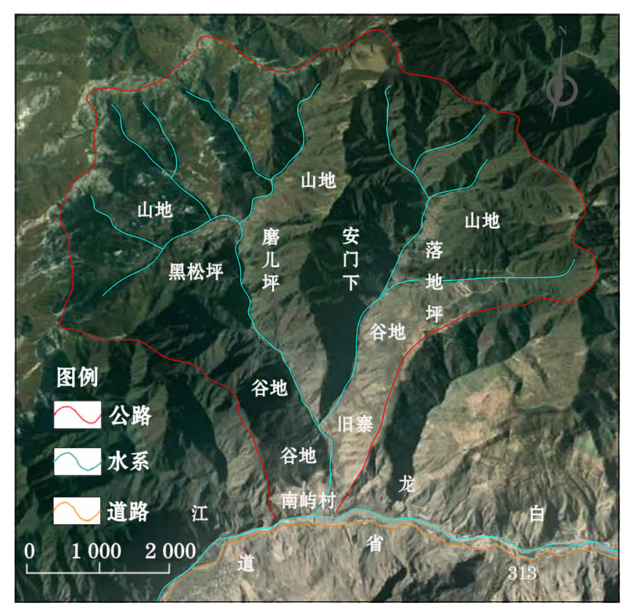


图 2 南峪沟沟道遥感影像图

Fig. 2 Remote sensing image map for Nanyu Gully

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

通过对依托工程已有野外收集到资料分析、归纳和总结,并结合作者经历过的甘肃舟曲、青海玉树等地区泥石流灾害防治工作,确定了各沟道泥石流灾害危险性主要影响因素。根据《泥石流灾害防治工程勘查规范》[12]中区域泥石流活动综合评判量化标准和野外调查结果,确定了各沟道主要影响因素的参数值见表 1。

表 1 南峪沟各沟道综合特征参数

Tab. 1 Comprehensive feature of different gully on Nanyu Gully

沟道名称	松散物源量 /10^4 m³	冲淤变幅 / m	灾害点密度 / 个·km⁻²	沟道堵塞程度(堵塞系数)	流域面积 / km²	沟道长度 / km	平均纵坡降 / ‰	植被覆盖率 / %	沟岸坡度 /°	流域内人口密度 / 个·km⁻²
南峪沟	318	1.66	3	1.2	3.50	1.5	106	18	57	200
磨儿坪沟	860	1.73	10	1.1	27.40	4.1	118	20	65	100
新官湾沟	9	1.51	0	1.0	3.51	1.2	344	80	65	27
黑山沟	10	1.75	0	1.1	8.69	2.3	197	82	63	38
安门下沟	390	1.86	6	1.2	19.80	2.7	200	30	65	180
安门下支沟 1	163	2.85	1	1.3	4.31	3.5	245	47	70	135
安门下支沟 2	40	2.70	1	1.3	11.22	4.5	260	50	75	128
黑松坪沟	5	1.62	0	1.1	3.53	2.5	253	80	60	50
黑松坪支沟 1	10	1.58	0	1.0	10.85	3.8	200	75	50	35
黑松坪支沟 2	7	1.60	0	1.0	4.64	3.4	225	82	65	30

2.2 研究方法

2.2.1 危险性指标计算方法 层次分析法的基本思路为:(1) 依据所分析问题的性质及要达到目标,将各元素按照其属性和隶属关系分解成阶递状结构。(2) 将同层不同元素相互比较,并给各指标的相对重要性予量化描述,基于各指标量化值构造判断矩阵。(3) 由判断矩阵计算每层各指标的相对重要性次序值,并做一致性检验。(4) 确定指标层影响元素对系统总目标的综合评价结果。

2.2.2 影响因素关联度计算方法 灰色关联度分析即是应用关联度分析系统中各个因素间关系的数据分析方法,其反应了因素之间在发展过程中的关联程度,若两个因素的变化趋势相一致,则二者的相关联程度较高[11]。灰色关联度分析法一般分为以下几个步骤:(1) 确定系统行为特征的参考数列和比较数列。(2)对参考数列和比较数列进行均值化处理。(3) 求参考数列与比较数列的关联系数。(4) 求关联度。(5) 对关联度排序。

2.2.3 危险性预估模型建立方法 灰色模型能够较真实地反映系统内部事物发展变化规律,且具有较高精度和简单实用等特点[13],其建模主要过程如下所述:

(1) $X^{(0)}=\{x_i^{(0)}(k)\mid k=1,2,\cdots,n;\ i=0,1,2,\cdots,n\}$ 为所要预测试样的原始数据数列,对原始数据作一次累加生成处理得到数列 $X_i^{(1)}=\{x_i^{(1)}(k)\mid k=1,2,\cdots,n,\ i=0,1,2,\cdots,n\}$,其中:$X_i^{(1)}(k)=\sum_{i=0}^{k}x_i^{(0)}(k)$;

(2) 构造判断矩阵

$$B=\begin{bmatrix} z_0^{(1)}(2) & z_1^{(1)}(2) & \cdots & z_n^{(1)}(2) \\ z_0^{(1)}(3) & z_1^{(1)}(3) & \cdots & z_n^{(1)}(3) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ z_0^{(n)}(n) & z_1^{(1)}(n) & \cdots & z_n^{(1)}(n) \end{bmatrix}$$

$$Y_n=\begin{bmatrix} z_0^{(o)}(2) \\ z_0^{(o)}(3) \\ \cdots \\ z_0^{(o)}(n) \end{bmatrix}$$

,根据 $\hat{a}=(B^{\mathrm{T}}B)^{-1}B^{\mathrm{T}}Y=[a,b_1,b_2,\cdots,b_n]^{\mathrm{T}}$ 用最小二乘法求出为辨识参数 a 和 b;

(3) 将新生成数列的变化趋势用微分方程近似表述 $\frac{\mathrm{d}x_1^{(1)}}{\mathrm{d}t}+ax_0^{(1)}=b_1x_1^{(1)}+b_2x_2^{(1)}+\cdots+b_nx_n^{(1)}$;

(4) 求出预估模型 $\hat{x}_1^{(1)}(k+1)=\left(x_0^{(1)}-\frac{1}{a}\sum_{i=1}^{n}b_ix_i^{(1)}(k+1)\right)\mathrm{e}^{-ak}+\frac{1}{a}\sum_{i=1}^{n}b_ix_i^{(1)}(k+1)$;

(5) 精度检验。

3 结果与分析

3.1 泥石流易发性指标计算

泥石流易发性指标的合理确定是准确评价各影响因素关联度及建立泥石流灾害危险性预估模型的基础。基于对研究区域内各沟道泥石流灾害野外调查资料归纳总结和分析,并考虑到同一区域内不同沟道所在区域的降雨量、地震及地质构造等影响因素差异性较小,建立了如图 3 所示泥石流易发性评价指标计算体系。以 X_i 表示泥石流易发性影响条件,X_{ij}和 X_{ik}分别表示隶属于不同影响条件 X_i 的任意两个影响因素。

基于表 1 南峪沟各沟道综合特征参数和图 3 泥石流灾害易发性评价指标计算体系,根据前述层次分析方法思路计算出各沟道泥石流易发性指标值,将其作为泥石流灾害危险性影响因素灰色关联度分析的参考序列,结果如下表 2。

由表 2 计算结果可知,磨儿坪沟、新官湾沟、安门下沟、安门下 1 支沟及安门下 2 支沟泥石灾害的流易发程度高,黑山沟、黑松坪沟及黑松坪 2 支沟泥石流灾害的易发性程度一般,南屿沟和黑松坪 1 支沟泥石流灾害的易发程度较低,其与野外实际调研结果相一致。根据野外调研,与其它沟道相比较磨儿坪沟、新官湾沟、安门下沟、安门下 1 支沟及安门下 2 支沟等的沟岸坡度、流域面积、松散固体物源量及沟道纵坡降等影响泥石流灾害易发性的因素中某项或某几项值较大,其共同作用引起泥石流发生的可能性大;南屿沟位于流域下游,人类活动主要表现为开矿和开垦农田,植被破坏严重,但其沟谷宽阔且较为平坦易于泥石流停淤,减缓其流速,泥石流发生的可能性一般;黑松坪 2 支沟位于流域上游尽管沟道纵坡降、流域面积及植被覆盖率较大,但沟岸坡度、松散固体物源量、灾害点数量及堵塞系数等影响因素值较小,泥石流发生的可能性较小。

3.2 泥石流影响因素关联度分析

根据前述不同影响因素的灰关联度计算方法,选 取表2中泥石流灾害易发性指标(I)作为参考数

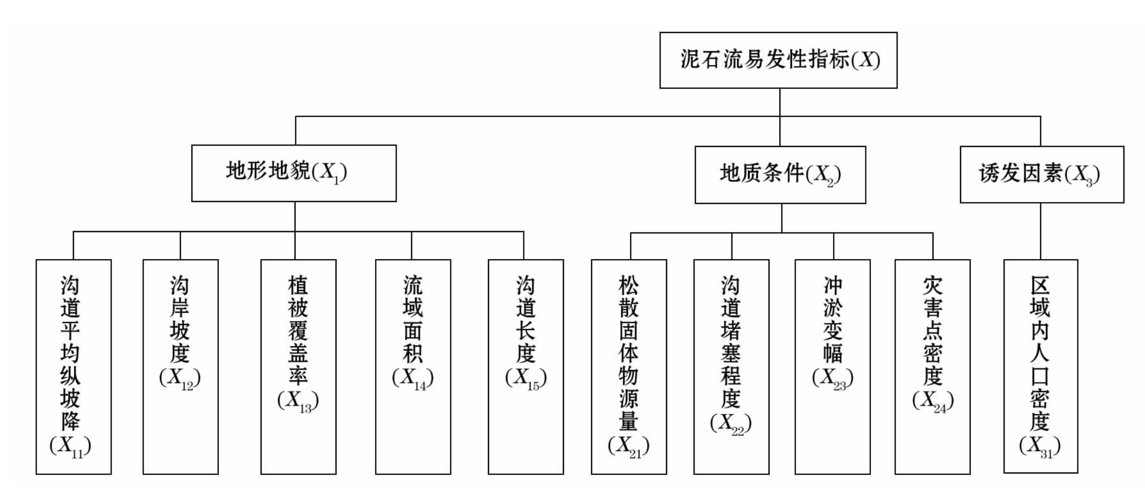


图 3　泥石流易发性指标计算体系

Fig. 3　Evaluation system for occurrence easiness of mud-rock flow hazards

表 2　各沟道易发性指标计算值

Tab. 2　Comprehensive evaluation on different gullies of Nanyu Gully

沟道名称	南峪沟	磨儿坪沟	新官湾沟	黑山沟	安门下沟	安门下 1 支沟	安门下 2 支沟	黑松坪沟	黑松坪 1 支沟	黑松坪 2 支沟
综合评价指数(X)	0.51	0.65	0.62	0.56	0.67	0.66	0.69	0.58	0.53	0.57
野外调研易发程度	低	高	高	一般	高	高	高	一般	低	一般

列,选取沟道平均纵坡降(S)、人口密度(P)、沟岸坡度(G)、植被覆盖率(V)、流域面积(A)、沟道长度(L)、松散固体物源量(M)、沟道堵塞程度(B)、灾害点密度(D)、冲淤变幅(E)等因素作为比较数列,并进行均值化处理,结果见表 3。根据均值化处理结果各影响因素关联度系数,如下图 4 所示。

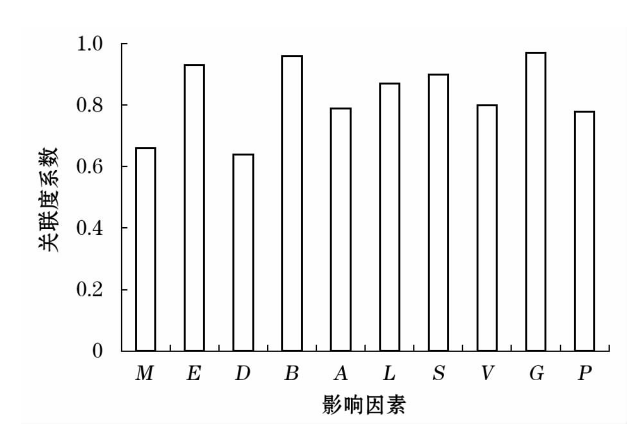
从图 4 可以看出,同一沟道区域内泥石流灾害危险性与沟道平均纵坡降(S)、沟岸坡度(G)、植被覆盖率(V)、流域面积(A)、沟道长度(L)、松散固体物源量(M)、沟道堵塞程度(B)、冲淤变幅(E)、灾害点密度(D)及人口密度(P)等因素间相关程度由大到小顺序为:$\gamma_G > \gamma_B > \gamma_E > \gamma_S > \gamma_L > \gamma_V > \gamma_A > \gamma_P > \gamma_M > \gamma_D$;泥石流灾害危险性指标与沟道的坡度、堵塞程度、冲淤变幅等的相关程度接近,说明其影响程度接近,且可知其影响最为显著;泥石流灾害危险性与沟道平均纵坡降和长度的相关程度较接近,且其影响程度仅次于沟岸坡度、沟道堵塞程度及冲淤变幅,影响程度较为显著;泥石流灾害危险性与沟道内植被覆盖率、流域面积及人口密度的相关程度较接近,其影响程度一般;泥石流灾害危险性与沟道内松

表 3　原始数据的均值化处理

Tab. 3　Results on mean value of survey data

沟道名称	I $X_0(k)$	M $X_1(k)$	E $X_2(k)$	D $X_3(k)$	B $X_4(k)$	A $X_5(k)$	L $X_6(k)$	S $X_7(k)$	V $X_8(k)$	G $X_9(k)$	P $X_{10}(k)$
南峪沟	0.84	1.75	0.88	1.43	1.06	0.36	0.51	0.49	0.32	0.90	2.17
磨儿坪沟	1.08	4.75	0.92	4.76	0.97	2.81	1.39	0.55	0.35	1.02	1.08
新官湾沟	1.03	0.05	0.80	0.00	0.88	0.36	0.41	1.60	1.42	1.02	0.29
黑山沟	0.93	0.06	0.93	0.00	0.97	0.89	0.78	0.92	1.45	0.99	0.41
安门下沟	1.11	2.15	0.99	2.86	1.06	2.03	0.92	0.93	0.53	1.02	1.95
安门下 1 支沟	1.09	0.90	1.51	0.48	1.15	0.44	1.19	1.14	0.83	1.10	1.46
安门下 2 支沟	1.14	0.22	1.43	0.48	1.15	1.15	1.53	1.21	0.89	1.18	1.39
黑松坪沟	0.96	0.03	0.86	0.00	0.97	0.36	0.85	1.18	1.42	0.94	0.54
黑松坪 1 支沟	0.88	0.06	0.84	0.00	0.88	1.11	1.29	0.93	1.33	0.79	0.38
黑松坪 2 支沟	0.94	0.04	0.85	0.00	0.88	0.48	1.15	1.05	1.45	1.02	0.33

注:$X_0(k)$表示泥石流易发性指标;$X_i(k)$表示影响泥石流灾害发生的因素



注：M 为松散固体物源量，E 为冲淤变幅，D 为灾害点密度，B 为沟道堵塞程度，A 为流域面积，L 为沟道长度，S 为沟道平均纵坡降，V 为植被覆盖率，G 为沟岸坡度，P 为人口密度

图 4　泥石流灾害危险性与不同影响因素间关联度

Fig. 4　Results on correlation coefficient and correlation degree of different influencing factors

散固体物源量和灾害点密度的相关程度较接近，由图4可知其影响程度较小。由上述分析可知，南峪沟泥石流灾害危险性的主要影响因素有沟岸坡度、沟道堵塞程度、冲淤变幅、沟道平均纵坡降及长度。

表 4　泥石流灾害危险性模型原始数据

Tab. 4　Primary data of the susceptibility model of mud-rock flow hazards

沟道名称	G /°	B （堵塞系数）	E / m	S /‰	L / km	M / 10^4 m^3
南峪沟	57	1.2	1.66	106	1.5	318
磨儿坪沟	65	1.1	1.73	118	4.1	860
新官湾沟	65	1.0	1.51	344	1.2	9
黑山沟	63	1.1	1.75	197	2.3	10
安门下沟	65	1.2	1.86	200	2.7	390
安门下 1 支沟	70	1.3	2.85	245	3.5	163
安门下 2 支沟	75	1.3	2.70	260	4.5	40
黑松坪沟	60	1.1	1.62	253	2.5	5
黑松坪 1 支沟	50	1.0	1.58	200	3.8	10
黑松坪 2 支沟	65	1.0	1.60	225	3.4	7

3.3　泥石流危险性灰色建模

根据泥石流灾害危险性影响因素灰关联分析结果，并结合作者已有泥石流灾害治理工程经验，选取沟岸坡度(G)、沟道堵塞程度(B)、冲淤变幅(E)、平均纵坡降(S)、长度(L)及松散固体物源量(M)等 6 个因子作为泥石流危险性建模参数，相关数据见表 4。

（1）对原始数据进行累加处理：对表 4 中数据进行初值化处理，并作一次累加处理生成，结果见表 5。

（2）求参数 a 和 b

设 $Z_0^{(1)}$ 为 $X_0^{(1)}$ 紧邻数据均值生成序列，$Z_0^{(1)}(k) = -0.5\left[x_0^{(1)}(k-1) + x_0^{(1)}(k)\right]$（其中 $k = 2, 3, \cdots, 10$），则有：$Z_0^{(1)} = (z_0^{(1)}(2), z_0^{(1)}(3), z_0^{(1)}(4), z_0^{(1)}(5), z_0^{(1)}(6), z_0^{(1)}(7), z_0^{(1)}(8), z_0^{(1)}(9), z_0^{(1)}(10)) = (-1.64, -2.88, -4.04, -5.25, -6.55, -7.87, -9.12, -10.21, -11.28)$

故有：

$$B = \begin{bmatrix} -1.64 & 2.14 & 1.92 & 2.04 & 2.11 & 3.73 & 3.70 \\ -2.88 & 3.28 & 2.75 & 2.95 & 5.36 & 4.53 & 3.73 \\ -4.04 & 4.39 & 3.67 & 4.01 & 7.22 & 6.07 & 3.76 \\ -5.25 & 5.53 & 4.67 & 5.13 & 9.10 & 7.87 & 4.99 \\ -6.55 & 6.75 & 5.75 & 6.84 & 11.42 & 10.20 & 5.50 \\ -7.87 & 8.07 & 6.83 & 8.47 & 13.87 & 13.20 & 5.63 \\ -9.12 & 9.12 & 7.75 & 9.45 & 16.25 & 14.87 & 5.64 \\ -10.21 & 10.00 & 8.58 & 10.40 & 18.14 & 17.40 & 5.68 \\ -11.28 & 11.14 & 9.42 & 11.36 & 20.26 & 19.67 & 5.70 \end{bmatrix}$$

表 5　累加处理结果

Tab. 5　Rresults of the cumulative processing for initialization data

编号	I $x_0^{(1)}(k)$	G $x_1^{(1)}(k)$	B $x_2^{(1)}(k)$	E $x_3^{(1)}(k)$	S $x_4^{(1)}(k)$	L $x_5^{(1)}(k)$	M $x_6^{(1)}(k)$
$x_i^{(1)}(1)$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
$x_i^{(1)}(2)$	2.27	2.14	1.92	2.04	2.11	3.73	3.70
$x_i^{(1)}(3)$	3.49	3.28	2.75	2.95	5.36	4.53	3.73
$x_i^{(1)}(4)$	4.59	4.39	3.67	4.01	7.22	6.07	3.76
$x_i^{(1)}(5)$	5.90	5.53	4.67	5.13	9.10	7.87	4.99
$x_i^{(1)}(6)$	7.20	6.75	5.75	6.84	11.42	10.20	5.50
$x_i^{(1)}(7)$	8.55	8.07	6.83	8.47	13.87	13.20	5.63
$x_i^{(1)}(8)$	9.69	9.12	7.75	9.45	16.25	14.87	5.64
$x_i^{(1)}(9)$	10.73	10.00	8.58	10.40	18.14	17.40	5.68
$x_i^{(1)}(10)$	11.84	11.14	9.42	11.36	20.26	19.67	5.70

$Y_n = [2.27, 3.49, 4.59, 5.90, 7.20, 8.55, 9.69, 10.73, 11.84]^T$,则有:$\hat{a} = [a, b]^T = (0.498, 0.402, -0.085, -0.036, 0.064, 0.042, 0.146)^T$。

(3) 求响应值 $\hat{x}_0^{(1)}$

将求得参数 $\hat{a}$ 代入 GM(1,7)模型,得其白化方程的近似时间响应式为:$\hat{x}_1^{(1)}(k+1) = \left[1 - 0.498\sum_{i=1}^{5} b_i x_i^{(1)}(k+1)\right] e^{-0.5k} + 0.498\sum_{i=1}^{5} b_i x_i^{1}(k+1)$,其中:$k=0,1,2\cdots,5$。

将比较数列 $X_1^{(1)} \sim X_6^{(1)}$ 值分别代入上式可得行为主数列的各数据的响应值为:$\hat{x}_0^{(1)} = (1, 1.76, 2.98, 4.24, 5.83, 7.35, 8.87, 10.08, 11.14, 12.38)$。

(4) 建立预估模型

综上所述可知,当已知沟岸坡度(G)、沟道堵塞程度(B)、冲淤变幅(E)、平均纵坡降(S)、长度(L)及松散固体物源量(M)等参数后,可根据下式预估泥石流灾害危险性评价指,进而判断其危险性。

$$\hat{x}_0^{(1)}(k+1) = \left[1 - \frac{1}{a}\sum_{i=1}^{5} b_i x_i^{(1)}(k+1)\right] e^{-0.7k} + \frac{1}{a}\sum_{i=1}^{5} b_i x_i^{(1)}(k+1) \qquad k \geqslant 10$$

$$\hat{x}_0^{(1)}(k+1) = \left[\hat{x}_0^{(1)}(k+1) - \hat{x}_0^{(1)}(k)\right] \times 0.51$$

其中,$\hat{a} = (a, b_1, b_2 \cdots, b_6)^T = (0.498, 0.402, -0.085, -0.036, 0.064, 0.042, 0.146)^T$。

(5) 模型精度检验

对建立的泥石流灾害危险性评价预测模型式进行残差大小和后验差检验,经计算得到泥石流危险性指标计算值与预测数据的平均相对误差为7.5%、最大相对误差为 17%,其均小于 20% 满足要求;原始序列和残差序列的均方差比值为 0.15 介于 0 与 0.35 之间,小误差概率为 1.41 大于 0.95,故所建泥石流灾害危险性评价预测模型的精度等级为一级(优)。

4 结 论

本文结合甘肃舟曲南峪沟泥石流灾害实例,利用灰色理论分析了不同影响因素与泥石流灾害危险性的关联程度,并建立了其危险性评价预估模型,得出以下主要结论:

(1) 南峪沟区域内 10 条主要沟道泥石流灾害易发程度由高到低顺序为:$I_{安门下2支沟} > I_{安门下沟} > I_{安门下1支沟} > I_{磨儿坪沟} > I_{新官湾沟} > I_{黑松坪沟} > I_{黑松坪2支沟} > I_{黑山沟} > I_{黑松坪1支沟} > I_{南屿沟}$,其与野外调研结果相一致。

(2) 相同区域内不同沟道的沟岸坡度、沟道堵塞程度及冲淤变幅,沟道平均纵坡降和长度,沟道内植被覆盖率、流域面积及人口密度,松散固体物源量和灾害点密度等影响因素分别对泥石流灾害危险性影响程度接近,且沟岸坡度、沟道堵塞程度、冲淤变幅、沟道平均纵坡降及长度等因素的影响显著。

(3) 建立了综合考虑自然和人为影响因素的泥石流灾害危险性预估模型,经验证其能够预判不同沟道泥石流灾害的危险性程度,为区域内泥流灾害防治工作的整体部署提供了重要依据。

本文基于对甘肃舟曲南屿沟泥石流灾害调研资料的总结分析和作者所经历过的其它泥石流灾害防治工作,利用灰色理论分析了影响泥石流灾害危险性各因素间主次关系,建立了综合考虑沟岸坡度、沟道堵塞程度、冲淤变幅、平均纵坡降、长度及松散固体物源量等影响因素的泥石流灾害危险性预估模型,研究结果为类似地区泥流灾害防治工作的部署提供了重要依据,但所建模型较为复杂,拟在下一步研究工作中对其进一步优化,以使其在实际工程中更好地应用。

参考文献(References)

[1] 王士革,范晓岭. 低频率泥石流灾害及工程防治[J]. 山地学报,2006,24(5):562 - 568. [WANG Shige, FAN Xiaoling. The hazards and engineering control of low frequecy debris flow[J]. Journal of Mountain Science,2006,24(5):562 - 568.]

[2] 郭瑞,马富存,郭一兵,等. 基于层次分析法的泥石流易发性评价[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2016,39(4):347 - 351. [GUO Rui, MA Fucun, GUO Yibin, et al. Debris flow evaluation of occurrence easiness based on AHP[J]. Journal of East China University of Technology,2016,39(4):347 - 351.]

[3] 史明远,丁桂伶,陈剑平,等. 基于博弈论和 K 均值的北京山区小流域综合敏感性评价[J]. 工程地质学报,2015,23(4):790 - 794. [SHI Mingyuan, DING Guiling, CHEN Jianping, et al. Game theory and *K*-means algorithm based comprehensive susceptibility analysis of catchments for debris flows in mountainous area of Beijing[J]. Journal of Engineering Geology,2015,23(4):790 - 794.]

[4] 周纵横,任光明,许英杰,等. 汶川震区清平乡绵远河流域泥石流发育特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报,2017,28(1):30 - 35. [ZHOU Zongheng, REN Guangming, XU Yingjie, et al.

Characteristics of the debris flow in Qingping country of Mianyuan River Basin, epicenter Wenchuan earthquake [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2017, 28(1): 30 – 35.]
[5] 曹禄来,徐林荣,陈舒阳,等. 基于模糊神经网络的泥石流易发性评价[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 144 – 147. [CAO Lulai, XU Linrong, CHEN Shuyang, et al. Assessment of debris flow hazard based on fuzzy network [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 144 – 147.]
[6] 陈伟,任光明,左三胜. 泥石流危险度的模糊综合评判[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2): 138 – 139. [CHEN Wei, REN Guangming, ZUO Sansheng. Fuzzy comprehensive evaluation method to judge dangerous degree of debris flow [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(2): 138 – 139.]
[7] 路遥,徐林荣,陈舒阳,等. 基于博弈论组合赋权的泥石流易发性评价[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 194 – 200. [LU Yao, XU Linrong, CHEN Shuyang, et al. Combined weight method based on game theory for debris flow hazard risk assessment [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(1): 194 – 200.]
[8] MARTIN Y E, JOHNSON E A, CHAIKINA O. Gully recharge rates and debris flows: A combined numerical modeling and field-based investigation, Haida Gwaii, British Columbia [J]. Geomorphology, 2016, 278(1): 252 – 268.
[9] NI H Y. Experimental study on initiation of gully-type debris flow based on artificial rainfall and channel runoff [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(10): 6213 – 6227.
[10] 冯逸,张诚,陈永云. 灰色关联理论在泡沫温拌沥青生产关键参数优选中的应用研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2014, 31(2): 119 – 123. [FENG Yi, ZHANG Cheng, CHEN Yongyun. The optimization studies of foam warm mix asphalt production critical parameter based on gray relative theory [J]. Journal of Guizhou University (Natural Science Edition), 2014, 31(2): 119 – 123.]
[11] 符小阳,李家盛,余剑英. 环境因素对车辙影响的灰色关联度分析[J]. 交通科技, 2018, 286(1): 87 – 90. [FU Xiaoyang, LI Jiasheng, YU Jianying. The grey relational analysis of external factors on rutting formation [J]. Transporation Science & Technology, 2018, 286(1): 87 – 90.]
[12] DZ/T 0220—2006. 泥石流灾害防治工程勘查规范[S]. DZ/T 0220—2006. Specification of geological investigation for debris flow stabilization [S].
[13] 刘建威,钟泽湘. 基于改进灰色GM(1,1)模型的高速公路路基沉降预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1369 – 1373. [LIU Jianwei, ZHONG Zexiang. Prediction of expressway subgrade settlement based on animproved gray prediction model [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(6): 1369 – 1373.]

Application of grey theory in hazard assessment of debris flow disaster in Nanyu Gully of Zhouqu County

GUO Guang-ling[1], GUO Rui[1], GU Jian-feng[2], LI Jun[1], GUO Hong[1], CHEN Neng-yuan[3]

(1 *School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong* 723001, *Shaanxi, China*;
2 *School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan* 430073, *Hubei, China*;
3 *China Electronic Research Institute of Engineering Investigations and Design, Xi'an* 710054, *Shaanxi, China*)

Abstract: This paper focused on analyzing the vulnerability degree on debris flow hazards, which is affected by various environmental factors. The correlation degree between different influencing factors and debris flow disaster susceptibility were studied using grey correlation analysis based on the analysis and summary of the field survey results on influencing factors for debris flow hazards in different debris flow gullies of Nanyu in Zhouqu County, Gansu Province, China which included the "August 8" large debris flow disaster instance. The results show that the susceptibility of debris flow disaster is relatively similar for the factors such as bank slope, channel blockage, and scouring range, the slope gradient and length of channel, vegetation, drainage area, and population density, solid matter source and geological hazards points density. For the different gullies in the same area, the hazard level of the debris flow disaster is impacted significantly by the bank slope, the channel blockage, the scouring range, the slope gradient, and the channel length. The model can predict the vulnerability of debris flow and provide important information in the hazard prevention and control.

Key words: geological engineering; mud-rock flow hazards; grey correlation theory; susceptibility assessment